

**ДОЛМАТОВ А.И.**, докт. техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков

**ЖОВНОВАТЮК Я.С.**, науч. сотр., НАКУ «ХАИ», Харьков

**ЖИТНЯЯ О.С.**, техник, НАКУ «ХАИ», Харьков

**ОНИЩЕНКО С.В.**, магистр НАКУ «ХАИ», Харьков

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ЛОКАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ БОЛЬШОЙ КРИВИЗНЫ**

Проанализированы различные технологические способы электрогидроимпульсной штамповки (ЭГШ) локальных элементов большой кривизны (с характерным радиусом меньшим 10 толщин заготовки). Представлены результаты опытной штамповки листовых деталей с данными конструктивными элементами. Даны рекомендации по применению рассмотренных технологических способов.

Проаналізовані різні технологічні способи електрогідроімпульсного штампування (ЕГШ) локальних елементів великої кривизни (з характерним радіусом меншим 10 товщин заготовки). Представлені результати дослідного штампування листових деталей з даними конструктивними елементами. Надані рекомендації з використання розглянутих технологічних способів.

Different manufacturing techniques of electrohydraulic impact forming (EHF) of high curvature local elements (with a characteristic radius less than 10 thicknesses of blank) are analyzed. The results of the experimental forming of sheet components with these structural elements are presented. Recommendations for manufacturing techniques application are given.

### **1. Анализ проблемы**

Схемы электрогидравлической штамповки широко и успешно используются в производстве широкой номенклатуры листовых деталей. Обычно используется один жесткий инструмент – матрица или пуансон, прижимная плита и разрядная камера. Процесс штамповки может осуществляться с эластичной диафрагмой, чтобы предотвратить контакт воды с поверхностью листовой заготовки (сухой процесс) и без диафрагмы, чтобы улучшить эффективность преобразования электрической энергии в энергию пластической деформации (мокрый процесс).

Многие листовые детали имеют большую глубину или имеют локальные элементы (ребра, бобышки, углы малого радиуса, пуклевки и т.п.), изготовление которых с использованием обычных схем ЭГШ невозможно или очень дорого. С целью эффективного изготовления деталей с такими элементами применяются специальные технологические способы

Специальные технологические приемы позволяют улучшить процесс штамповки путем применения дешевой (по сравнению со стоимостью основной оснастки) дополнительной оснастки, ковриков, проставок, модификации основной оснастки, улучшения организации процесса штамповки.

Целью этой работы является изучение практического применения нескольких специальных технологических приемов и разработка рекомендаций по их использованию в процессах ЭГШ.

## 2. Результаты эксперимента

Эксперимент выполнялся в технологическом блоке экспериментальной электрогидравлической установки УЭГШ-2, оборудованном разрядным блоком (рис. 1), в котором можно разместить 52 изолированных электрода. Общим противоэлектродом служит разрядная плита с отверстиями. Энергия подается к электродам от генератора импульсных токов по 22-м контурам с рабочим напряжением до 40 кВ [1].

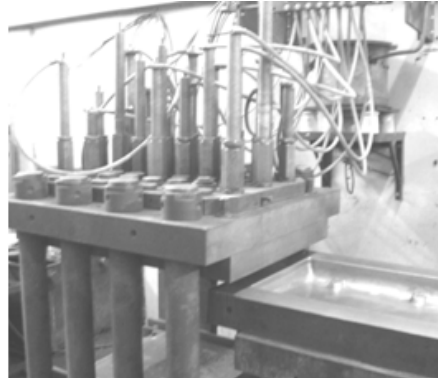


Рис. 1. Общий вид многоэлектродного разрядного блока электрогидравлической установки УЭГШ-2

### 2.1 Применение промежуточных плит

Проблемой при штамповке глубоких угловых элементов коробчатых листовых деталей является избыточное утонение и разрыв листового металла в процессе штамповки. Установлено, что, когда заготовка касается дна матрицы, процесс вытяжки и подача фланца в полость матрицы практически останавливаются. Штамповка угловых элементов осуществляется за счёт растяжения той части заготовки, которая не соприкасается с поверхностью матрицы (рис. 2). Кривая, показанная на рис. 2, б построена с учетом следующих допущений: 1) штамповка углового элемента осуществляется постепенно за несколько шагов (обычно ЭГШ выполняется за несколько разрядов) с приращениями  $\Delta h$  вдоль боковой стенки матрицы и  $\Delta l$  вдоль ее дна; 2) участок листовой заготовки представлен равносторонним треугольником, который является основанием пирамиды с вершиной в донном углу (вблизи радиуса  $r$ ); 3) для каждого шага штамповки исходная площадь равна площади равностороннего треугольника  $A_i$  и конечная площадь равна сумме площадей  $A_{i+1}$  боковой поверхности усеченной пирамиды и равностороннего треугольника; 4) объёмы металла при деформировании равны для начального и конечного момента для каждого шага деформирования; 5) толщины деформированного участка заготовки  $t_i$  и  $t_{i+1}$  равномерно распределены по площадям  $A_i$  и  $A_{i+1}$  соответственно.

Очевидно (рис. 2, б), что в случае глубоких углов, листовой металл быстро теряет пластичность из-за концентрации деформаций в быстро сокращающемся участке заготовки, вследствие чего возникают разрывы. Этот теоретический анализ многократно подтверждался практикой ЭГШ коробчатых листовых деталей. В этом случае оправдано применение промежуточных плит для глубокой вытяжки. Суть способа состоит в подаче достаточного количества листового материала в полость матрицы для дальнейшей штамповки угловых элементов.

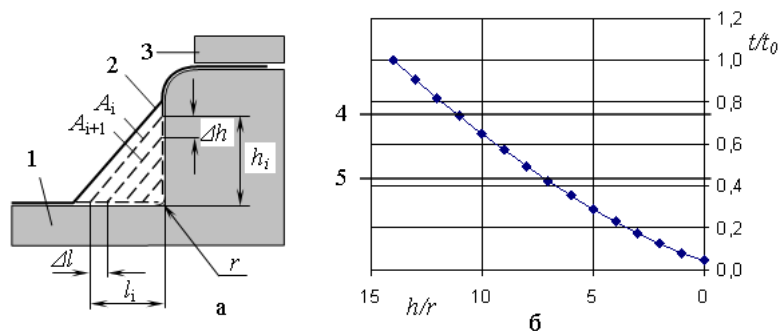


Рис. 2. Схема штамповки углового элемента (а) и зависимость относительной толщины заготовки  $t/t_0$  от относительной глубины  $h/r$  (б): 1. Угловой участок матрицы; 2. Листовая заготовка; 3. Прижимная плита; 4. Предел пластичности малопластичных металлов; 5. Предел пластичности высокопластичных металлов;  $t_0$  – толщина листа перед штамповкой углового элемента;  $r$  – радиус дна матрицы

Полуфабрикат, который подвергся глубокой вытяжке, имеет высоту большую, чем окончательная деталь (рис. 3). На последующих этапах штамповки материал заготовки перераспределяется и заполняет углы без разрывов. На окончательной стадии избыток материала перемещается вдоль донной поверхности матрицы в направлении угла (рис. 3, б и 3, в).

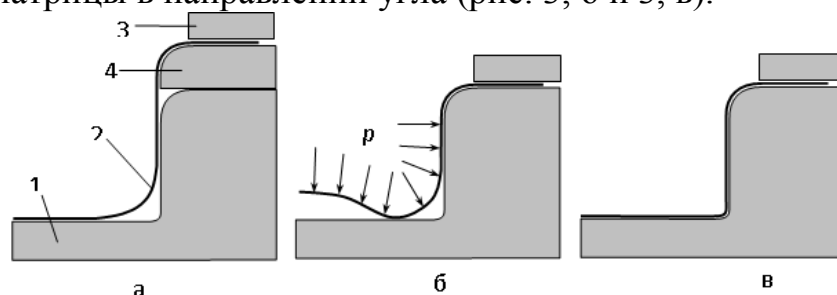


Рис. 3. Последовательность штамповки углового элемента с промежуточной плитой:  
а. Вытяжка предварительной формы; б. Уменьшение высоты полуфабриката;  
в. Формовка и калибровка: 1. Угловой элемент матрицы; 2. Листовая заготовка;  
3. Прижимная плита; 4. Промежуточная плита

С целью изготовления угловых элементов глубоких деталей также используются другие способы. Радиус перетяжного ребра матрицы выполняют большим по сравнению с прямолинейными участками, где желательна большая сопротивляемость вытяжке для стабилизации процесса. Оба способа позволили отладить процесс ЭГШ для изготовления коробчатых деталей (рис. 4) из высокопрочного алюминиевого сплава АМгб толщиной 2 мм.

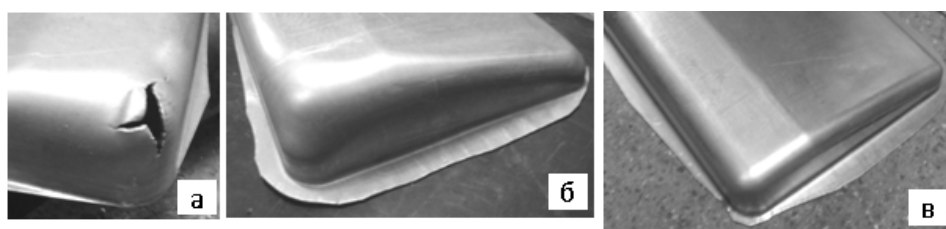


Рис. 4. Участки коробчатой детали: а. С разрывом в углу, отштампованная непосредственно в окончательную матрицу; б. Большей глубины, отштампованная с промежуточной плитой; в. Без разрыва за счет применения специальных технологических приемов

## 2.2 Применение ковриков

Коврики рекомендуется использовать в случае очень маленьких радиусов локальных элементов, которые являются причиной разрушения листового металла вдоль данных радиусов из-за концентрации растягивающих напряжений в комбинации с напряжениями изгиба. Обычно это такие элементы как бобышки или донный рельеф (пуклевки, канавки) с малыми радиусами (равными от 1 до 5 толщин листовой заготовки). Целью применения ковриков является набор материала для данного элемента при его предварительной формовке и уменьшение растягивающих напряжений при последующей калибровке.

Например, в матрице (см. рис. 1) штампуют коробчатую деталь из алюминиевого листа толщиной 2 мм. На детали выполнены 3 бобышки с радиусом ребра 4 мм, что составляет 2 толщины листа (рис. 5). На этапе формовки донных локальных элементов алюминиевый лист разрушается вдоль указанных радиусов. Установка на бобышке резинового коврика толщиной 5 мм увеличивает радиусы и позволяет набрать материал вокруг бобышки. Перед калибровкой этот материал не соприкасается с матрицей и поэтому может быть легко деформирован для образования нижнего радиуса бобышки.

С целью предотвращения складкообразования из-за возникающих напряжений сжатия рекомендуется принимать площадь рассматриваемого элемента до калибровки на (2...4)% меньше, чем площадь элемента готовой детали. В нашем случае окончательная площадь бобышки с прилегающими областями составила 7760,7 мм<sup>2</sup> (рис. 5, а), а площадь элемента до калибровки – 7644,7 мм<sup>2</sup> (рис. 6, а и 6, б), что дало разницу лишь 1,52 %. Этот прием позволил получить окончательную форму бобышки без разрывов и без значительного изменения формы отверстия (рис. 6, в). Это означает, что напряжения в листовом материале достаточны для деформирования, но меньше разрушающих. Отверстия просверлены для облегчения процесса деформирования и уменьшения напряжений на верхнем радиусе бобышки. Изготовление отверстий предусмотрено конструкцией коробчатой детали.

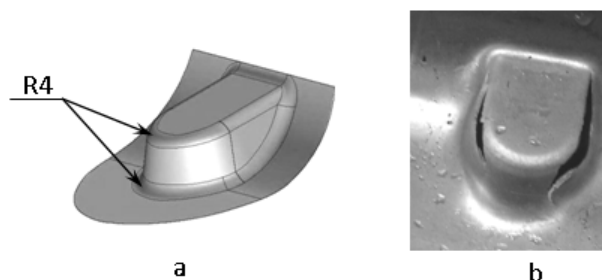


Рис.5. 3D модель бобышки (а) с прилегающей зоной, вовлеченной в процесс ее формообразования и трещины на бобышке (б), изготовленной в матрице без предварительной формовки

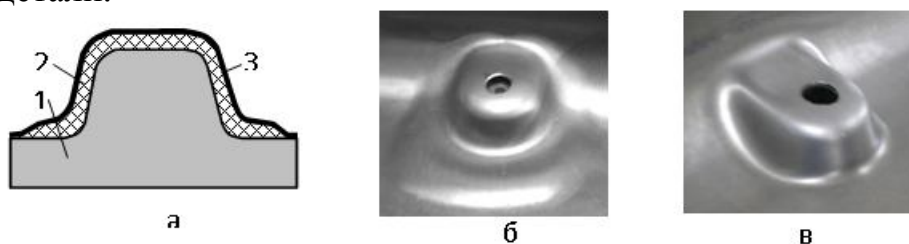


Рис.6. Схема применения коврика (а), бобышка, полученная с резиновым ковриком до окончательной деформации (б) и бобышка, откалиброванная в окончательную матрицу (в): 1. Элемент матрицы; 2. Коврик; 3. Листовая заготовка

### 2.3. Последовательное использование матрицы и пуансона

При штамповке трудно деформируемых материалов и листов большой толщины способом ЭГШ, возникают сложности при формообразовании элементов малого радиуса. В этом случае технологически и экономически эффективным может быть специальный технологический прием, состоящий в последовательном использовании матрицы и пуансона. Например, при производстве крупной профилированной детали (рис. 7, а) из углеродистой стали толщиной 2 мм возникли сложности при выполнении радиуса 6 мм, что составляет 3 толщины листа. В этом случае возникает объёмное напряжённо-деформированное состояние, а не двухосное. Верхний радиус 4 мм сравнительно легко получается при импульсном нагружении. Однако с целью формообразования малых донных радиусов ( $R_1$  и  $R_2$  на рис. 7, а) необходимо на стадии калибровки приложить сосредоточенные усилия (рис 7, б), т.е. использовать традиционный способ “матрица-пуансон”. Однако традиционная штамповая оснастка в несколько раз дороже оснастки для ЭГШ.

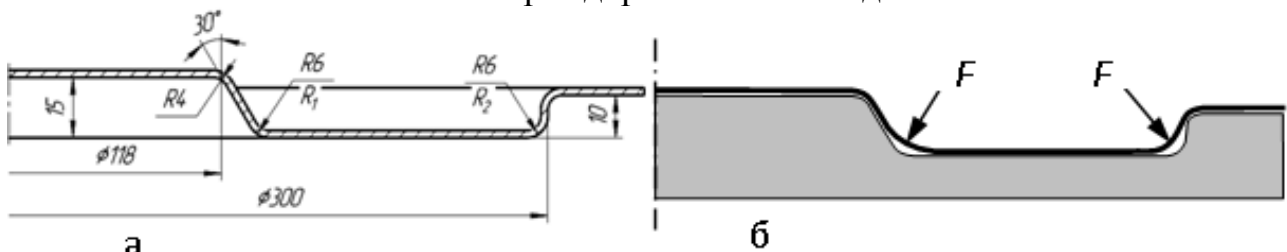


Рис. 7. Эскиз круглой детали из стали 20 толщиной 2 мм (а) и схема требуемого сосредоточенного нагружения давлением  $F$  на этапе калибровки в оснастке типа матрица

Решением этой проблемы является применение оснастки типа пуансон (рис. 8). В этом случае распределённая нагрузка давления  $p$  воздействует на большую площадь предварительно деформированной заготовки и, таким образом, создает большое деформирующее усилие, которое концентрируется на малых контактных поверхностях. Большое усилие, создаваемое сравнительно малым давлением  $p$  способно выполнить объёмное деформирование и сформировать окончательные радиусы  $R_1$  и  $R_2$ . В этой схеме усилие прижатия  $Q$  передается прижимным кольцом.

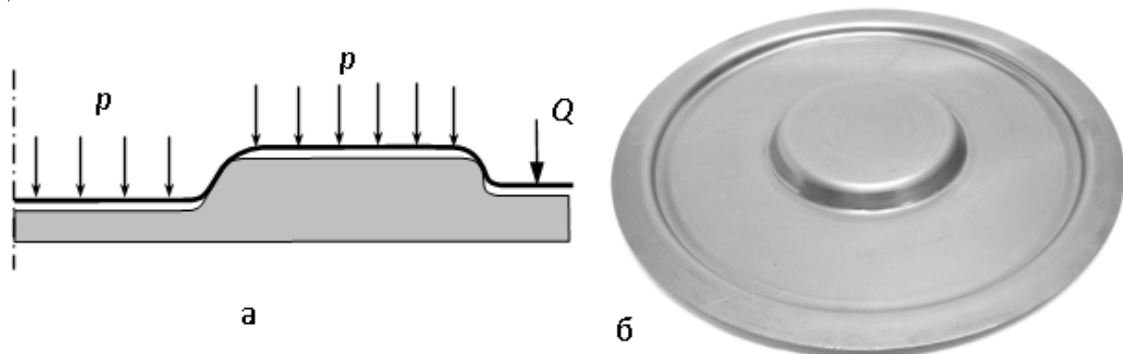


Рис. 8. Схема требуемого распределенного нагружения давлением  $p$  на стадии калибровки в оснастке типа пуансон (а) и общий вид отштампованной детали (б)

### 3. Обсуждение результатов экспериментов

Результаты проведенных экспериментов показали, что большое количество деталей сложной формы с локальными элементами большой кривизны невозможно изготовить способами обычно применяемыми в ЭГШ. Это связано с особенностями импульсного характера нагружения и свойствами среды (воды) для передачи нагружающего воздействия. Эти особенности определяют механизм деформации листовой заготовки, который отличается от механизма деформирования при использовании жестких пуансона и матрицы.

Кроме использования промежуточных плит для глубокой вытяжки, также применяемых для обычной штамповки в инструментальных штампах, способ ЭГШ имеет свои особенности на этапах формовки и калибровки локальных элементов. Перетяжной радиус с изменяемой величиной вдоль контура полости матрицы или перетяжной плиты часто используется для регулирования подачи элементов фланца заготовки при глубокой вытяжке. Литературные источники рекомендуют выбирать значение перетяжного радиуса исходя из соотношения  $r = (5..10)t$ , где  $t$  – толщина листового материала. Эта рекомендация не принимает в расчёт другие важные факторы, оказывающие влияние на стабильность процесса глубокой вытяжки (чтобы предотвратить складко- и гофрообразование): глубина вытягиваемой детали и радиус полости матрицы в плане.

Анализ результатов экспериментов, полученных в лаборатории ЭГШ ХАИ, позволяет предложить следующую зависимость для вычисления максимального значения перетяжного радиуса:

$$r_{max} = k \cdot \frac{t^3 \cdot R}{H},$$

где  $t$  – толщина заготовки, мм;  $R$  – радиус перетяжного ребра матрицы в плане, мм;  $H$  – глубина полости матрицы, мм;  $k = 20 \text{ мм}^{-2}$  – размерный коэффициент.

Значение, рассчитанное по вышеприведенной формуле, является максимальным, позволяющим осуществить глубокою вытяжку без складкообразования, малые гофры разравниваются перетяжным ребром, когда фланец движется в полость матрицы. Формула работает до момента, когда ширина технологического фланца становится минимальной и его край останавливается (при завершении процесса глубокой вытяжки) на начальной точке радиуса  $r_{max}$ .

Применение гибких ковриков является эффективным и недорогим приемом при изготовлении листовых деталей с локальными элементами с высоким качеством в условиях мелкосерийного производства. Однако их использование не ограничено только локальными элементами. Для деталей типа коробка проблемные угловые элементы могут быть изготовлены за счет набора материала на большом профилированном коврике, уложенном на дно матрицы, что подобно схеме штамповки, представленной на рис. 3.

Последовательное применение матрицы и пуансона эффективно для листовых деталей большой толщины, высокой прочности и малой пластичности.

Способ концентрации энергии кумуляцией на газовых полостях эффективен для труднодеформируемых материалов при изготовлении сравнительно малых

локальных элементов. Однако газовые полости часто невозможно разместить внутри разрядной камеры. Их применение значительно увеличивает подготовительное время штамповки.

Концентрация давления с применением электродных пар направленного воздействия позволяет увеличить в 1,2...2 раза давление ударной волны, и в 2...4 раза импульс гидротока. Это повышение достигается за счет отражающих и направляющих поверхностей, расположенных вокруг электрода и разрядного промежутка. Однако такие электроды требуют устройств позиционирования в требуемых местах заготовки.

Применение проволочек для стабилизации электрических разрядов и управление полями нагружения достаточно хороший способ [2]. Однако он требует сравнительно большого подготовительного времени. Также не существуют надежные механизмы подачи проволочки в межэлектродный промежуток.

Применение термообработки листовой заготовки, как технологического приема, имеет несколько направлений: отжиг всей заготовки на определенном этапе штамповки, отжиг отдельных участков полуфабриката (локальный отжиг) для обеспечения пластичности этих участков, горячая штамповка заготовок из малопластичных материалов; локальный нагрев определённых участков заготовки для облегчения глубокой вытяжки или формовки локальных элементов большой кривизны.

#### **4. Выводы**

Применение специальных технологических приемов, рассмотренных выше, позволяет значительно расширить технологические возможности способа ЭГШ для производства высококачественных листовых деталей.

Лаборатория ЭГШ ХАИ проводит исследования по совершенствованию технологических приемов, расширению их применения к деталям сложных пространственных форм из высокопрочных материалов.

**Список литературы:** 1. *Knyazyev M.K.* Application of Multi-Electrode Discharge Blocks in Small-Batch Production of Aircraft Components / *M.K. Knyazyev* // Proceedings of the 3rd International Conference "Supply on the Wings", 11-14.11.2008. – Frankfurt-am-Main, Germany, 2008. – 14 p. 2. *Krasik Ya.E.* Underwater Electrical Wire Explosion and Its Applications / *Ya.E. Krasik, A. Grinenko, A. Sayapin, S. Efimov, A. Fedotov, V.Z. Gurovich, V.I. Oreshkin* // IEEE Transactions On Plasma Science. – 2008. – Vol. 36, No. 2. – P. 423-434.